

de sorte que, quand il se fige, peut-être après plusieurs oscillations, il conserve une forme de rebond.

Le passage entre les conditions de formation d'un cratère simple à celles d'un cratère complexe se fait quand un seuil de résistance des matériaux a été atteint. Il a été calculé que ce seuil est facilement atteint étant donné l'énergie dissipée par unité de temps par un grand impact. Une fois ce seuil de résistance dépassé, les roches ne présentent qu'une très faible cohésion tandis que leur coefficient de frottement est devenu presque nul. La notion de fluidisation acoustique (une réduction des frottements entre débris rocheux due aux vibrations acoustiques) introduite par J. Melosh est celle qui rend le mieux compte de cette dégradation transitoire de la résis-

tance des matériaux. Ce domaine reste toutefois très débattu par les théoriciens.

Comment identifier un cratère d'impact ? Comme l'illustrent les exemples rapportés, le rôle des images satellitaires est devenu essentiel pour repérer les structures circulaires candidates. Pour autant, elles ne dispensent jamais d'une étude au sol.

Identification : au sol !

Pour y faire quelles constatations ? Tout d'abord, pour y étudier les caractéristiques de la structure, telles la géométrie du cratère, la présence de terrasses concentriques, d'un relief ou d'un pic central, etc. Mais certains astrolèmes, celui de Rochechouart en France, par exemple, n'auraient jamais été reconnus du ciel ! Sur place,

on ne trouve que très rarement des débris météoritiques, car, dans la plupart des cas, le matériau de l'impacteur est volatilisé, fondu et éjecté au loin.

En revanche, des brèches d'impact sont produites dans tous les cas. En géologie, le terme de brèches désigne des roches composées d'au moins 50 pour cent d'éléments grossiers fixés par un ciment naturel. Les brèches d'impact se forment à partir des éjectas, c'est-à-dire de débris de roches fondues, choquées, ou simplement broyées, et d'un remplissage provenant des éjectas fins. Il existe de nombreuses variétés de brèches d'impact, dont les plus remarquables sont sans doute les suévites, parce qu'elles contiennent des éléments vitreux, donc du matériel fondu. Les suévites ont été définies au Ries, où elles forment une couche de 400 mètres d'épaisseur dans le fond du cratère, puis reconnues dans de nombreux astrolèmes à travers le monde : elles sont typiques des dépôts qui remplissent les cratères.

Toutefois, outre les brèches d'impact, il existe des brèches sédimentaires, tectoniques, volcaniques... C'est pourquoi la présence de brèches n'est pas suffisante en soi pour caractériser un impact : il faut pour cela qu'elles présentent au niveau microscopique les preuves d'un métamorphisme de choc. Dans son livre faisant référence, le géologue Bevan French, de la *Smithsonian Institution* de Washington, aux États-Unis, décrit en détail les roches perturbées

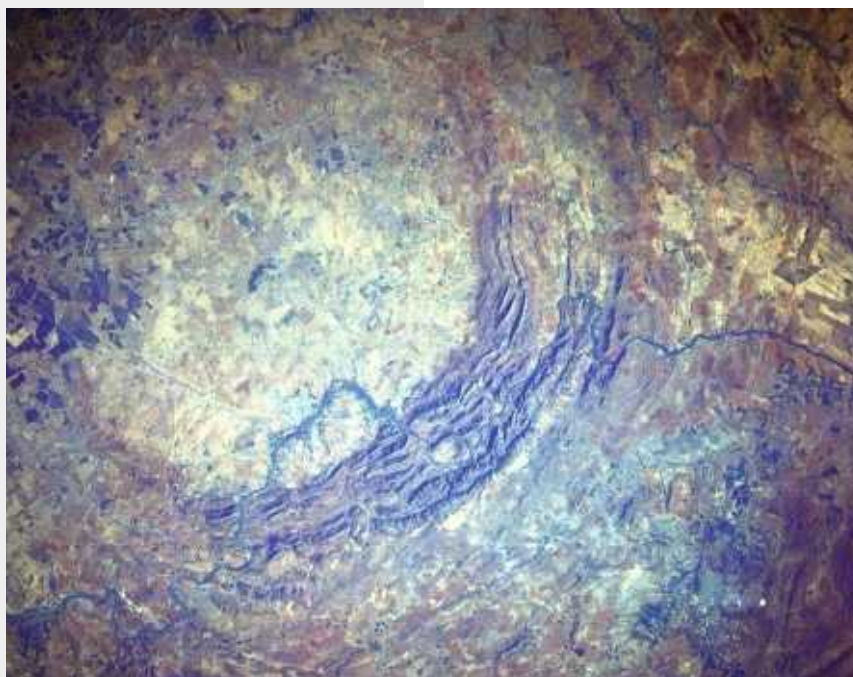
LE VREDEFORT : ASTROBLÈME GÉANT

Le Vredefort est le plus grand cratère d'impact connu sur Terre. De 250 à 300 kilomètres, son cratère est plus large que les 250 kilomètres du cratère de Sudbury au Canada et que les 170 kilomètres du cratère de Chicxulub au Mexique (qui aurait causé la fin des dinosaures). L'astéroïde qui l'a créé aurait mesuré plus de dix kilomètres de diamètre.

L'astrolème de Vredefort (*ci-dessous, une vue satellitaire*) est aussi extrêmement ancien, puisqu'il a été formé en pleine ère précambrienne, il y a environ deux milliards d'années. Il est donc très érodé, toutes ses impactites ayant disparu depuis longtemps. Toutefois, les structures subsistantes indiquent qu'il s'agit de l'un des rares cratères à anneaux multiples de la Terre. Ce type de cratères est produit par les plus grands impacts. Les anneaux concentriques peuvent atteindre des centaines de kilomètres de diamètre. L'une des théories pour les expliquer est que l'impact crée dans la croûte terrestre d'immenses vagues qui se figent sous la forme d'anneaux. Elles sont rares sur Terre car, très anciennes, elles ont été érodées ou ont disparu. En revanche, elles sont conservées et faciles à observer sur les autres planètes telluriques et la Lune. Le bassin oriental sur la Lune, avec ses cinq anneaux, en est l'archétype.

L'une des conséquences géologiques majeures est que les plis ainsi créés (formant ce que les géologues nomment des synclinaux et des anticlinaux) sont autant de pièges à minéraux. C'est ce qui explique que la moitié de l'or produit sur Terre, mais aussi beaucoup d'uranium aient été extraits autour du Vredefort. Au-delà du cratère du Vredefort et de sa couronne, les formations du Witvaters-

rand, les plissements circulaires qui font onduler les formations du Witvatersrand, ont longtemps été protégées de l'érosion par une couche d'impactites. L'or qui s'y est accumulé avait été libéré par la destruction de filons au cours des temps géologiques. Il est actuellement conservé dans les synclinaux, particulièrement celui de la *Golden Belt*. Comme il est antérieur à l'impact, bien qu'une partie ait été remaniée par l'activité hydrothermale consécutive à celui-ci, c'est bien à la formation du cratère qu'il doit de ne pas avoir été érodé.



Connu sous l'appellation « le Clot », ce petit cratère est situé dans l'Hérault, à 1,5 kilomètre au Sud du village de Cabrerolles. Il mesure 220 mètres de diamètre pour une profondeur de 50 mètres. Sa forme est circulaire, avec des parois abruptes et un fond plat planté de vigne (à droite). Il est creusé dans des grès et des schistes carbonifères, ce qui semble exclure la possibilité d'une origine karstique (le creusement de roches carbonatées solubles, surtout du calcaire). C'est pourquoi, en 1950, les géologues Bernard Gèze et André Cailleux avaient suggéré qu'il pouvait s'agir d'un cratère d'impact météoritique, l'argument principal étant qu'on imagine mal un

autre mécanisme capable de produire dans ce contexte un tel cratère. Cela a suffi à son inscription sur l'inventaire international des cratères d'impact, mais il en a été exclu en 1977, les critères d'inscription étant devenus plus rigoureux... Les quelques recherches effectuées depuis n'ont pas permis de trouver des arguments en faveur de l'hypothèse de l'impact. Les impactites signalées un temps (des cônes de percussion) se sont révélées ne pas en être, et aucun quartz choqué n'a été trouvé à ce jour.

Dans un cratère d'impact simple, même de petite taille, les rebords sont normalement plus ou moins rebroussés, ce qui n'est pas le cas ici. On peut suggérer qu'une ori-



P. Vincent

gine karstique profonde est possible : les couches de calcaire dévonien, qui affleurent un kilomètre au Nord du Clot, se poursuivent probablement quelques centaines de mètres au-dessous. L'effondrement d'une cavité formée par érosion karstique (les calcaires se dissol-

vent dans l'eau) pourrait donc être à l'origine du Clot. Plus au Nord, dans les calcaires, deux autres dépressions fermées de plus petite taille confirment cette possibilité. Le Clot de Cabrerolles n'en reste pas moins remarquable pour sa beauté — et pour son vin !

dans leur structure intime, donnant ainsi une définition au sens large des impactites.

Quelles sont les impactites possibles ? Les seules vraiment évidentes à l'œil nu sont les cônes de percussion, nommés *shatter cones* en anglais (voir l'encadré page 44). Ces cônes se forment habituellement dans des roches isotropes, à grain fin, qui ne sont pas présentes sur tous les terrains.

Impactites

Les autres impactites ne sont identifiables qu'au microscope. Elles contiennent des minéraux qui ne se forment qu'à très haute pression et haute température. Ainsi, la coésite et la stishovite sont des minéraux de silice qui proviennent de la transformation du quartz. Ce sont aussi les minéraux choqués, des minéraux initialement non isotropes, mais qui le sont devenus (on parle de minéraux isotropisés) ou encore des verres de fusion.

Le carbone ayant subi une pression extrême — le diamant — est assez fréquent dans les impactites, où il prend la forme de minuscules cristaux mesurant une fraction de millimètre. Ces cristaux résultent de la transformation de roches-cibles contenant du graphite. Parmi les minéraux choqués, les quartz sont particulièrement utiles à l'identification d'un cratère, car ils sont très stables, même s'ils peuvent finir par disparaître eux aussi par recuit thermique ou recristallisation. Enfin, les pseudotachylites ont été

décrites pour la première fois dans l'astrolème du Vredefort, en Afrique du Sud. Ces roches vitrifiées par frottement ne sont pas spécifiques des impacts, mais elles en fournissent un indice important quand elles sont associées à une tectonique particulière.

Tandis que les impactites sont formées pendant la propagation des ondes de choc, d'autres roches peuvent l'être pendant la modification du cratère transitoire. Ainsi, comme à Rochechouart, il est apparu que les glissements de blocs à l'origine des terrasses peuvent produire un verre : la pseudotachylite.

L'incessant bombardement des astres du Système solaire par des objets cosmiques n'a pas laissé sur la surface de la Terre les mêmes cicatrices que sur les autres planètes telluriques ou la Lune. Pour autant, même si la plupart des cratères terrestres ont disparu, on sait aujourd'hui le rôle géologique majeur joué par les cratères d'impact sur Terre. Soulignons que les cataclysmes d'origine cosmique ont joué un rôle essentiel dans l'évolution de la vie : tout indique qu'elle peut être interrompue par un événement qui la relance dans une nouvelle direction. Le bombardement cosmique de la Terre n'a certes plus l'ampleur qu'il avait au début du Système solaire, mais l'impact de la comète Shoemaker-Lévy-9 sur Jupiter, en 1994, nous rappelle que la formation des cratères d'impact n'est pas seulement de l'histoire ancienne... ■

✓ BIBLIOGRAPHIE

P. M. Vincent et A. Beauvilain, *Découverte d'un nouveau cratère d'impact météoritique en Afrique : l'astrolème de Gweni-Fada (Ennedi, Sahara du Tchad)*, *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, vol. 323, pp. 987-997, 1996.

C. Koeberl et al., *Aorounga and Gweni Fada impact structures, Chad : Remote sensing, petrography, and geochemistry of target rocks*, *Meteoritics & Planetary Science*, vol. 40, n° 9/10, pp. 1455-1471, 2005.

H. J. Melosh, *Impact Cratering. A Geologic Process*, Oxford University Press, 1996.

B. M. French, *Traces of Catastrophe : A Handbook of Shock-Metamorphic Effects in Terrestrial Meteorite Impact Structures*, Contribution 954, 120 p., Lunar and Planetary Institute, Houston, 1998.